農業氣象、空氣污染與酸雨對農業生產影響及因應措施
研討會論文專輯　191-202, 1996

臺灣西南部地區潛在蒸發散量之估算與應用

申 雍　黃學文
國立中興大學土壤環境科學系

內　容

摘要……192
英文摘要……192
前言……193
材料與方法……194
結果與討論……195
引用文獻……201

臺灣西南部地區潛在蒸發散量之估算與應用

申 雍 黃學文

國立中興大學土壤環境科學系

摘 要

地表蒸發散量的多寡，攸關地區水資源的規劃與利用。本研究先利用地理統計技術估算台灣西南部地區氣溫與日射量的空間分佈，再以Jensen-Haise法估算本地區潛在蒸發散量的空間分佈。由潛在蒸發散量的空間分佈資料，可進一步推估當地不同期作水稻的田間蒸發散量。研究結果顯示，本地區內水稻之田間蒸發散量，一、二期作分別約爲320至440㎜與500至580㎜，且皆呈由南到北漸減之趨勢，可作爲區內各農田水利會擬定轄區內灌溉計畫之參考。利用潛在蒸發散量的空間分佈資料以及當地土壤可利用水分和有效降雨資料，亦可評估旱季時區內土壤的乾旱程度，研究結果顯示，若無灌溉設施，區內以嘉南平原地區發生嚴重乾旱的機率最高，其次爲雲林地區與台中盆地附近，彰化地區則最低。

關鍵詞：潛在蒸發散量，土壤乾旱度，水資源

Estimation and Application of Potential Evapotranspiration in Southwest Region of Taiwan

Yuan Shen and Shyue Wen Huang (Department of Soil and Environment Science, National Chung-Hsing University., Taichung, Taiwan, ROC)

ABSTRACT： Amount of evapotranspiration from ground is of great concern to water resources management and planning. Spatial distribution of air temperature and solar radiation were first determined using geostatistical techniques. Potential evapotranspiration was then determined accordingly using Jensen-Haise method. The determined potential evapotranspiration was then used to estimate field evapotranspiration from rice paddy field. The evapotranspiration of the 1st and 2nd crop of rice in the region were 320 to 440 mm and 500 to 580 mm, respectively. These values are useful to local irrigation associations when making irrigation plans. Soil droughtiness during dry season were also evaluated in conjunction with available soil water and effective rainfall in the region. Results indicated that if there were no irrigation facilities, the probability of very drought was highest in Chia-Nan Plain, followed by Yuinlin Plain and Taichung Basin. The Changhua region had least chance of occurring.

Key words： Potential evapotranspiration, Soil droughtiness, Water resources.

前 言

土壤與水面之蒸發和植物的蒸散作用，是將液態水轉爲氣態水而散失的重要機制。因此，凡有關水資源管理與運用等方面之規劃，必須將地表之蒸發散量列爲重要的考量因子之一。但地表之蒸發散量受微氣象、植被、土壤等多項因子的綜合影響，一般對大範圍地區較長期間內蒸發散量之估算，常需先求出該地區於植被充分覆蓋、土壤水分供應充足情況下，受氣象條件影響的潛在蒸發散量（Potential evapotranspiration) (Penman，1949）。

利用氣象觀測資料估算地表潛在蒸發散量的方法可分爲下列幾大類(Rosenberg et al.，1983)：(1)以氣溫爲基礎之方程式：如Thornthwait 法、Blaney-Criddle 法、Hargreaves 法、Linacre 法；(2)以日射及氣溫爲基礎之方程式：如 Makkink法、Jensen-Haise 法、Solar Thermal Unit法；(3)應用多種氣象因子之混合法：如 Penman 法、Monteith-Penman法、Van Bavel法、Slatyer-McIlroy法、Priestley-Taylor 法。此外，在氣候潮濕地區，蒸發皿之蒸發量與潛在蒸發散量間具有近似1比1的密切關係（Brutsaert，1984）。

在台灣地區邱（1977）曾指出由於Thornthwait 法僅以氣溫決定蒸發散量，因此用於大區域的推算時會產生相當大的誤差，尤其是在山地地區。徐與宋（1987）則以簡化後的Penman 公式利用台灣地區七個氣象觀測站收集之氣象資料，分別估算各測站當地的月蒸發散量。施與黃（1989）利用 Thornthwaite 法、Blaney-Criddle 法、蒸發皿法與Penman 法來估算學甲地區玉米的需水量，並比較這些估算式的適用性，發現蒸發皿法與Penman 法所得之結果較Thornthwaite 法或Blaney-Criddle 法爲佳。但是，陳（1991）以各種作物需水估算模式推估嘉義地區的作物需水量時指出，雖然以Penman 法推估之盆面蒸發散量與實測值間有較好之相關性，但由於所需的觀測項目多，在應用上較爲複雜，而Jensen－Haise法雖相關性稍低，但方程式較簡易，實用性也較高。

應用氣象觀測資料估算區域之潛在蒸發散量時，還需考量所使用氣象測站資料的代表性。申與黃(1996)研究結果指出，即使在本省西南部地區的平原地形上，各氣象測站觀測之項目中，除氣溫與日射量有較廣的適用範圍外，其餘如濕度、風速、蒸發量等適用範圍均侷限在測站附近。因此若欲採蒸發皿法估算較大區域之潛在蒸發散量，需普設測站其結果才具代表性，但相對地所需之人力與設備費用也愈可觀，益形增加其困難性。若採用由多項氣象因子估算之混合法，如Penman 法或相關之修正法等，除需要風速、濕度等觀測值外，還需要淨輻射量與土壤熱流之測值，但此二項並非一般氣象觀測站之觀測項目，需由日射量或日照時間來推估，因此若以混合法估算大區域之蒸發散量，其準確性實有待確認。

在計算灌溉需水量時，潛在蒸發散量可用於其中有關作物蒸發散量之估算。本省目前每年可用的水資源（水庫、河川、地下水），約有192億立方公尺，而農業灌溉用水使用了120億立方公尺，其中又以水稻灌溉用水爲主（黃，1992）。

在台灣水資源不足應用之際，農業是否眞需要如此鉅量的灌漑用水，已成爲其他用水標的事業的質疑之一。目前台灣農田灌溉所需水量，係由各地區農田水利會依據式(1)估算（張與蔡，1985）。

灌溉需水量＝秧田、整田用水量＋田間蒸發散量＋田間滲漏量－有效雨量＋輸水損失 (1)

其中

田間蒸發散量＝潛在蒸發散量×作物係數 (2)

目前各農田水利會所使用之水稻田間蒸發散量皆依每期作600～700公厘進行估算（張與蔡，1985）。由於潛在蒸發散量受氣象環

境影響很大，因此有必要依據歷年氣象資料確實估算各灌區的潛在蒸發散量，並進而推估作物之田間蒸發散量。在作物係數方面，張與蔡（1985）與雜作灌溉手冊（1980）中列有水稻與多類旱作全生長期的作物係數。

潛在蒸發散量亦可用於土壤乾旱度的評估，而土壤乾旱度則可用於土地能限分類（Land capability classification）與乾旱機率之估算（Thomasson，1979）。Hall（1977）指出土壤的乾旱度可由土層有效水分(A)與每月潛在蒸發散量和有效降雨量間的差值（MD)，依式(3)進行評估，

$$土壤乾旱度 = A - \sum_{i=1}^{N} MDi \qquad (3)$$

其中N為作物的總生育月數。依土壤乾旱度數值之範圍可分為無乾旱（＞50 mm）、輕度乾旱（0～50 mm）、中度乾旱（-50～0 mm）與嚴重乾旱（＜-50 mm）四等級。土層有效水分係指土層中界於田間容水量與凋萎點間的水分含量，由土壤之質地、構造與根系分布深度而決定（張與蔡，1985）。徐（1967）曾對本省各主要土類定出其有效水分的重量百分率。至於根系分布的深度方面，台灣由於以往多年種植水稻之緣故，在20～30公分處常有犁底層之存在，限制水稻或旱作根系之伸展，若無犁底層之限制，旱作根系分佈之深度常可達1m或更深（蔡，1990）。有效降雨則指降雨中可進入土壤中之部分，因地形、作物類別、土壤入滲速率及原有水分含量、降雨強度與持續時間、栽培作物類別、田埂的高度等有所不同。

由於水稻係本區內種植的主要作物，所使用的灌溉水也最多，因此本研究擬依據區域內各農田水利會之灌溉區評估一、二期作水稻之田間蒸發散量，以供計算灌溉需水量時使用。再者，在當今水資源日益缺乏時，瞭解區內何處最易受乾旱影響，則有其實用上之重要性，因此本研究亦將評估區內各地土壤之乾旱度與發生嚴重乾旱之機率。

材料與方法

本研究之區域，北自大安溪、南迄二仁溪，含括台中縣、彰化縣、雲林縣、嘉義縣及台南縣等。除北端有八卦、大度台地外，全區平均海拔高度不超過 50 公尺，為由東南往西漸傾，且沒有特殊起伏地形的平原地型。研究中所用氣象資料取自央氣象局 1990至1994年氣候資料年報（第一部份，地面資料）中的月平均值，選取的測站包括中央氣象局直屬氣象站－梧棲（46777）、台中（46749）、嘉義（46748），和設於農業試驗單位的一級農業氣象站－農試所（G2F82）、畜產試驗所（B2N89），及由糖研所維護之台糖公司農業氣象站－新營試驗場（52O30）、糖試所（52N11），與嘉南農田水利會學甲旱作灌溉研究中心（12O57）等 8站(圖1)。

在估算區內潛在蒸發散量之空間分布前，先以式(4)（Jensen and Haise，1963）求出所選用測站之盆面蒸發量（ETpan）與氣溫（Ta）和日射量（Rs）間的關係，其中學甲測站（12O57）因蒸發量資料不全，故未列入分析。

$$ETpan=Rs（a + b \times Ta） \qquad (4)$$

式中之參數a、b則以SAS（Statistical Analysis System，V. 6.03）之非線性迴歸分析程序（PROC NLIN）得出。再利用地理統計軟體（GS＋，Professional Version 2.11，Gamma Design Software）之 Block－Kriging 方法計算區內各年每月氣溫與日射量於 2 km×2km 網格下的空間分布值。然後依估算之氣溫與日射量，由式(4)分別求出各網格位置的潛在蒸發散量值。其中，台中(46749)測站之氣溫值可能因都市熱島效應而偏高（申與黃，1996），因此在估算氣溫之空間分布時，並不予以取用。

水稻的田間蒸發散量則分一、二期作，以下述方法估算。雖然水稻的全生育期依

期作與地區而有不同（曾等，1984），研究中將水稻之全生育期簡化為四個月，一期作由3月至6月，二期作由7月至10月，而各期作水稻在不同生育階段的作物係數則引用張與蔡（1985）之資料；由於研究中對於潛在蒸發散量之估算係以月為計算單位，因此再以水稻各生育階段在當月中的天數為權重，估算各月的作物係數。由各月之潛在蒸發散量乘以當月的作物係數，即可得當月水稻之田間蒸發散量，將每期四個月的蒸發散量累加，即得該期水稻田的總蒸發散量。並以地理資訊系統軟體（MapInfo, MapInfo Corporation）依各農田水利會所轄灌區之分布位置（台灣區農田水利會聯合會，1994），統計各農田水利會所轄灌區各期水稻之總蒸發散量。

計算區內各地土壤乾旱度時，土層的有效水分（A，mm）依台灣主要土類之分布區域（謝與王，1991）以式(5)計算：

$$A = 重量含水率 \times 總體密度 \times 土層厚度 \qquad (5)$$

各土類之土壤有效重量含水率取自徐(1967)。由於本省土壤之總體密度主要介於1.2～1.4 g/cm^3間（曾，1981），為求簡化均以1.3 g/cm^3 來計算。土層厚度則取用20cm與1m兩種，分別代表犁底層是否去除情形下的土壤乾旱度。每月雨量之空間分布則取用區內所有雨量測站（340站，平均密度10km^2）之測值，利用地理統計軟體 GS＋進行2km×2km網格之分析；而有效雨量則以月降雨量之60％計，但月之最大有效雨量，則依所用土層之厚度為1m或20cm而限制為180mm或90mm。雖在旱季時水分可從地下水層在土壤內向上移動，但在本研究中因顧及區內的地下水位深度變動情形不明；以及區內土壤主要屬沖積土，土壤水分在垂直方向移運的程度，易受土壤剖面質地不均一之影響而減少等因素，因此暫不考慮地下水位補注對土壤乾旱度的影響。

由於台灣西南部地區之旱季約從每年之10月開始，至次年5月梅雨季前結束，但2～3月間亦有獲得短暫春雨的可能，因此研究中再分別計算每年10月至次年1月，和10月至次年4月的土壤乾旱度，以區別春雨對各地土壤乾旱程度之影響。

結果與討論

各測站利用氣溫與日射量以式(4)估算盆面蒸發量時，所使用的參數a、b與決定係數列於表1。由表1可知除糖研所 (52N11)與農試所（G2F82）兩站外，其餘各站之決定係數都相當高，顯示以Jensen-Haise 法可

Table 1. Parameter values and determing coefficients when using Jensen-Haise type equations to compute monthly-pan evaporation for selected stations.

Station Location	Station Code	a	b	R^2
Chiayi	46748	0. 2021	0. 0100	0. 961
Taichung	46749	0. 2140	0. 0122	0. 940
Wuchi	46777	0. 3993	0. 0110	0. 830
Tainan	52N11	0. 4823	0. 0014	0. 733
Huuwoei	52O30	0. 3260	0. 0062	0. 863
Shinhuah	B2N89	0. 2044	0. 0086	0. 935
Wuhfeng	G2F82	0. 2721	0. 0121	0. 760
All Stations		0. 3011	0. 0084	0. 730

以有效的估算盆面蒸發散量。由於此法僅利用氣溫與日射量兩因子，並未考慮其他可能影響蒸發量的因素，如濕度、風速等的效應，因此各站間a與b參數值並不相同。若取表1中各站之參數a、b與 Jensen and Haise（1963）於美國西部乾旱地區所得之a、b值（0.08，0.025）相比較，本省各測站之參數a的值較高，參數b的值較低，此可能由於本省空氣中濕度高，盆面的飽和蒸發壓差變小，導致日射能量對盆面蒸發量的影響相對提高，因而研究區內之盆面蒸發散量亦可視爲當地之潛在蒸發散量。在研究中爲簡化式(4)中參數a、b之使用，則將區內7站之資料一同代入，以SAS（Statistical Analysis System，V. 6.03）求出其a、b值，亦列於表1。

區內以地理統計方法估算各地日射量空間分布之準確性，可由檢驗於各測站位置日射量之估算值與實測值得知(圖2)。本研究以地理統計法得到之日射量估算值與實測值間差值的標準偏差爲1.64MJ day^{-1}，若代入式(4)約可造成潛在蒸發散量之估算發生0.2 mm day^{-1}之誤差，佔區內平均每日 3 mm day^{-1}蒸發量之6％而已，顯示本研究所用之地理統計方法，對區內各地日射量估算之準確性，已足供計算該地區潛在蒸發散量之用。圖3則爲由式(4)估算區內每2km×2km網格之潛在蒸發量後，所得區內各地潛在蒸發量於冬季和夏季時典型的空間分布。由圖中可知潛在蒸發散量的空間分布，則約略呈現帶狀之分布，此與區內因地形平坦，日射量之分布依餘弦定律原理應大略與緯度平行的推論相符（Gates，1962）。此外，冬季時因氣溫與日射量均低於夏季，因此估算所得之各地潛在蒸發散量冬季比夏季低；但夏季時，潛在蒸發散量在嘉義和臺南地區的分佈，則顯現由東向西遞減的現象。

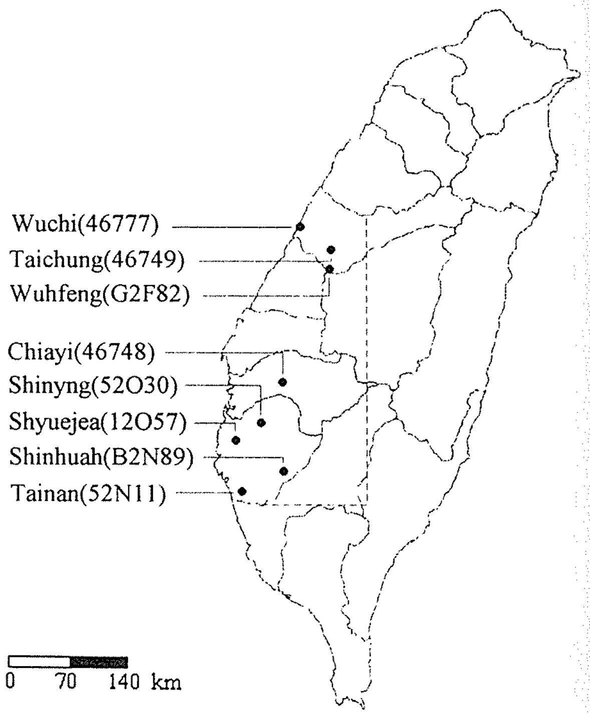

Figure 1. Spatial distribution of weather stations selected in this study.

台中、彰化、雲林、嘉南等四個農田水利會所轄灌溉區內，一、二期作水稻田每期平均蒸發散量之空間分布，分別示於圖4。由圖可知，區內一期作的田間蒸發散量約界於 320至 440 mm間，二期作則界於 500至 580 mm間，而兩期作水稻之蒸發散量皆呈現由南至北漸減之趨勢。但本研究所推估之每期水稻的蒸發散量，較早期所推算區內水稻一、二期作的蒸發散量分別界於840～950 mm與740～830 mm 之間(張與蔡，1985)爲低，造成此大差異的原因，仍有待究明。

依各農田水利會所轄灌區之位置，將所得水稻蒸發散量的空間分布值予以積分計算，可得該轄區內所有農田皆種植水稻時的總田間蒸發散量值，列於表2。圖5 則顯示區內各地點一、二期水稻五年間最大蒸發散量的分布情形，其與平均總蒸發散量間的差值，

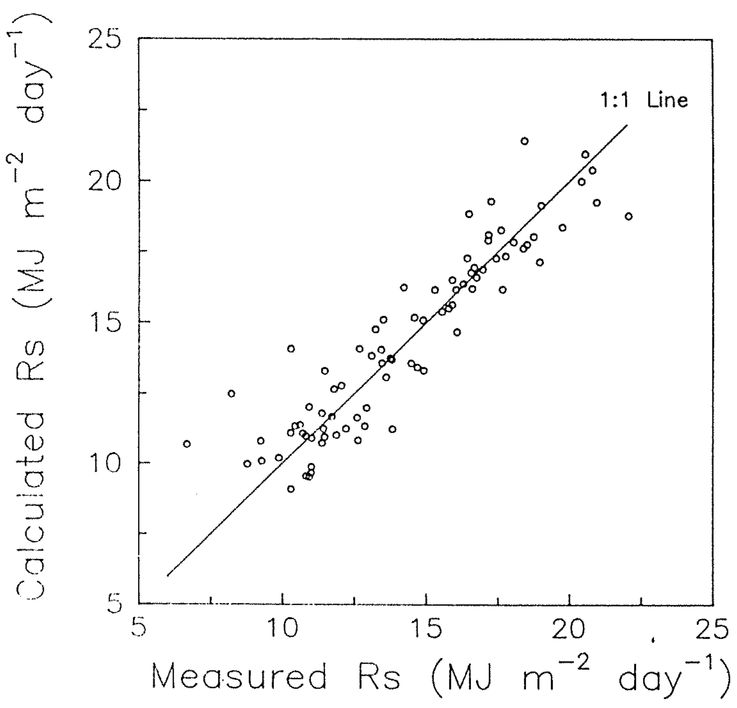

Figure 2. Comparisons between estimated and measured solar radiation.

Table 2. Estimated total evapotranspiration (G m^{3}) of first and second crop of rice from the juristic area of the four Agricultural Irrigation Association (AIA) in the study area during 1990-1994.

AIA	Irrigated Area (ha)	First Crop		Second Crop	
		AVG	MAX	AVG	MAX
Taichung	31202	0. 8	0. 9	1. 2	1. 3
Changhua	47119	1. 1	1. 2	1. 5	1. 7
Yuinlin	61088	2. 0	2. 0	2. 7	3. 0
Chia-Nan	78113	2. 2	2. 4	2. 9	3. 3

在研究區域之南端約爲 70mm，北端則約爲 40mm，此可能與區內南北兩端所接受日射量之差異有關。各農田水利會所轄灌區若全部種植水稻，最大之田間總蒸發散量值亦列於表2。表2中之數值可供進行水資源規劃時使用。

依據1990～1994的氣象資料計算，旱季間研究區內各地土壤乾旱度平均值的空間分布情形示於圖6與圖7，圖6A顯示若犁底層未打破，根系的伸展深度受限制，只能利用20cm內土壤中所儲存的水分，由10月到次年1月，全區都將達嚴重乾旱之等級；

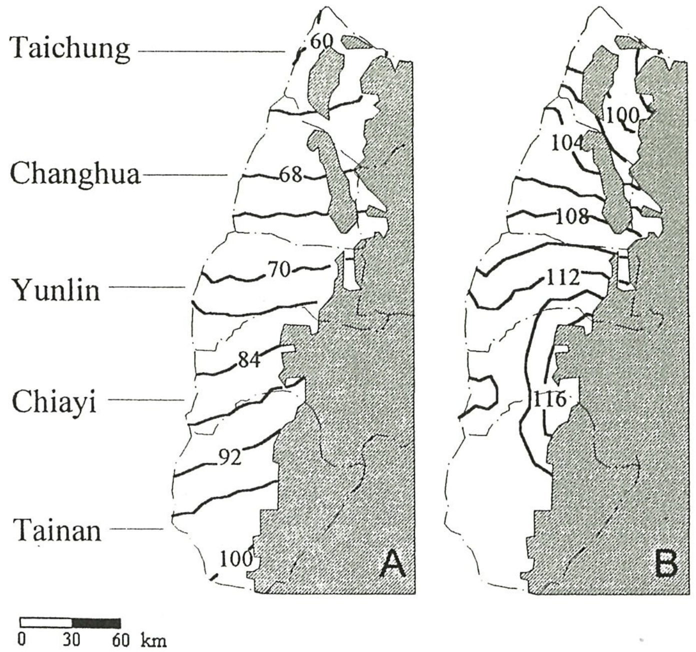

Figure 3. Typical spatial distribution of calculated monthly pan evaporation using Jensen-Haise equation and kriginged air temperature and solar radiation at winter (A) and summer (B) season.

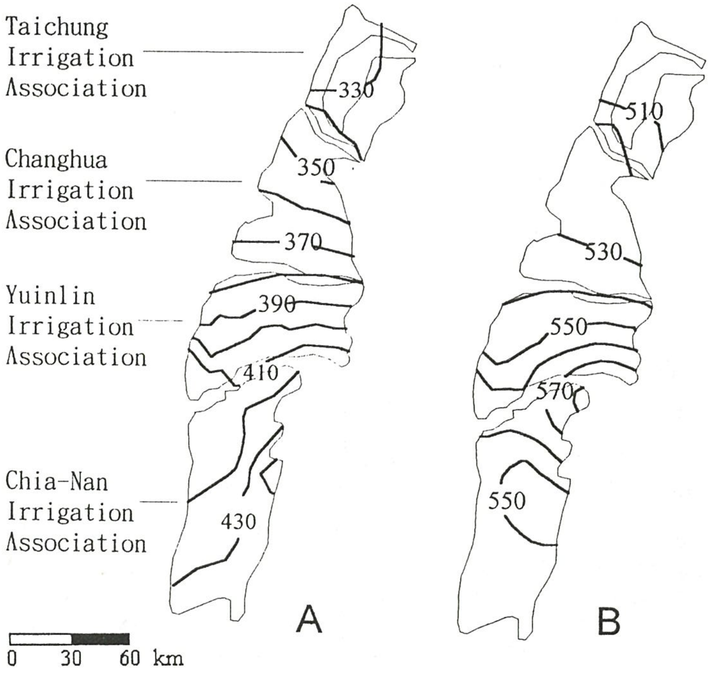

Figure 4. Spatial distribution of 5-year averaged total evapotranspiration for first (A) and second (B) crop of paddy rice during 1990-1994.

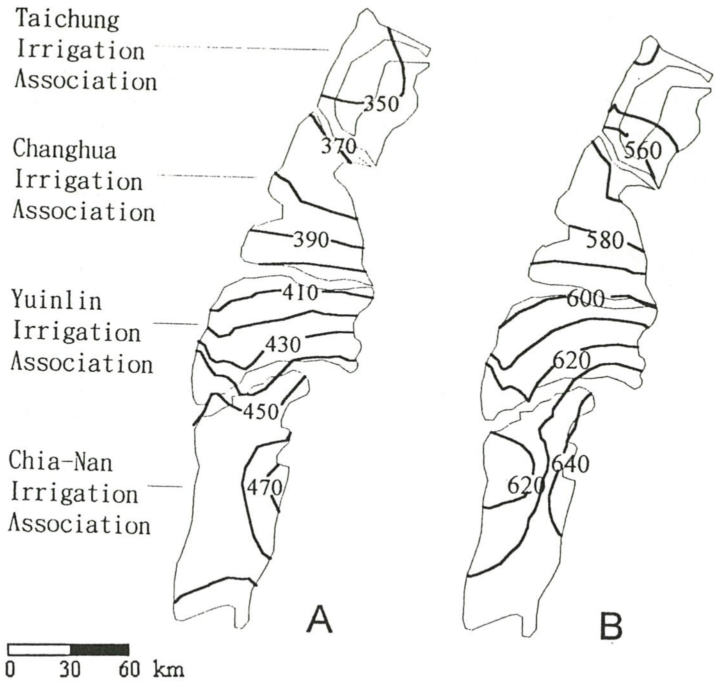

Figure 5. Spatial distribution of maximum total evapotranspiration for first (A) and second (B) crop of paddy rice during 1990-1994.

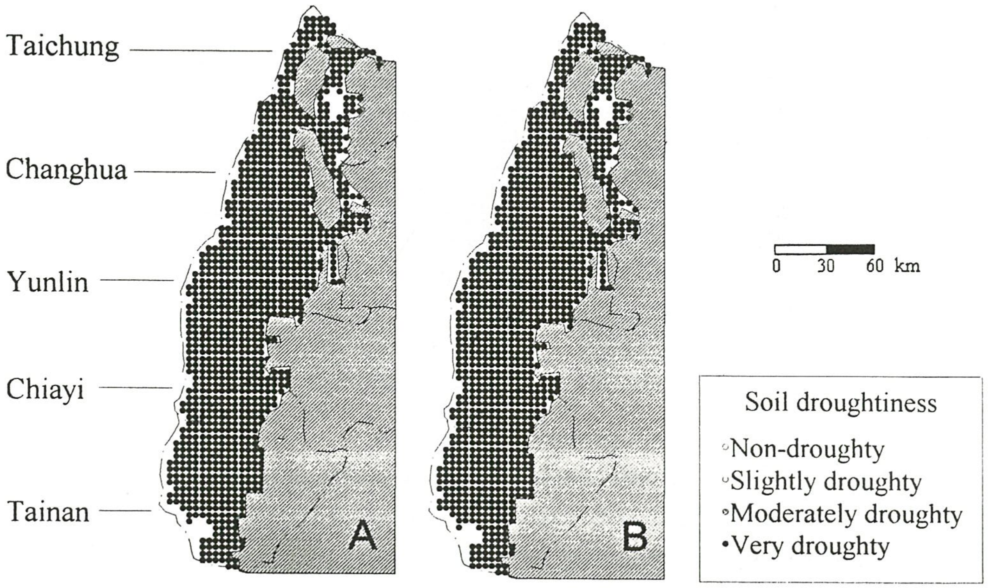

Figure 6. Spatial distribution of averaged soil droughtness for soils having effective depth of 20cm for period from October to next January (A) or next April (B).

即使加上2～3月間可能有的春雨，全區仍屬嚴重乾旱的等級（圖5 B），因此必須配合灌溉系統才可能種植作物。若土層厚度深，作物可以利用儲存於較深土壤中的水分，則區內除台中盆地週圍與研究區之南半部仍屬於嚴重乾旱等級外，研究區北半部之土壤乾旱度僅達中度乾旱的程度，在局部地區甚或不會有乾旱發生（圖7），表示在這些區域若能打破耕地之犁底層，使根系得以充分伸展，並種植能耐受短期乾旱之作物，即使不採行灌溉措施，仍可以得到相當之收成。

就各地發生嚴重乾旱的機率而言，圖8顯示即使將犁底層打破，使根系能充分伸展，但若無灌溉設施，嘉南平原地區發生嚴重乾旱危害的機率很高，其次爲雲林地區與台中盆地附近，而彰化地區發生嚴重乾旱之機率最低。雖然目前嘉南地區灌溉設施已相當完備，但有關之灌溉制度仍以水稻爲主，若擬種植旱作，則作物之種類與種植時期，需配合水利會的配水時間，否則需自覓可靠水源（張與蔡，1985），且近年每逢旱年，嘉南地區之水稻田常需休耕，以節約水源供其他標的事業使用，若日後雲林離島工業區完成後，區內水源之供應必定更加吃緊。因此，若擬在嘉南、雲林地區進行農業改良之投資，所選擇作物的耐旱程度與灌溉水源能否穩定供應，都是需審慎評估之項目。

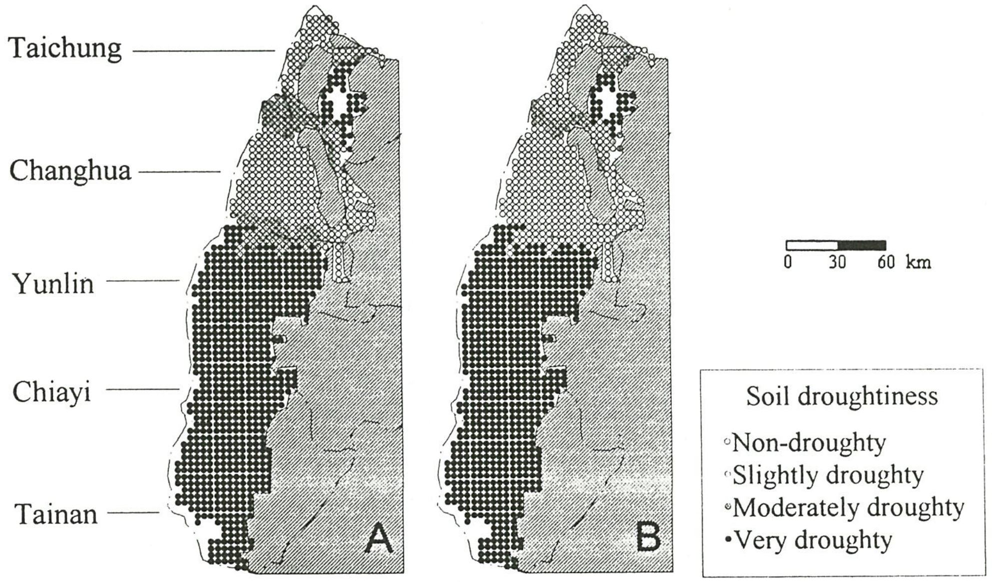

Figure 7. Spatial distribution of averaged soil droughtness for soils having effective depth of 1m for period from October to next January (A) or next April (B).

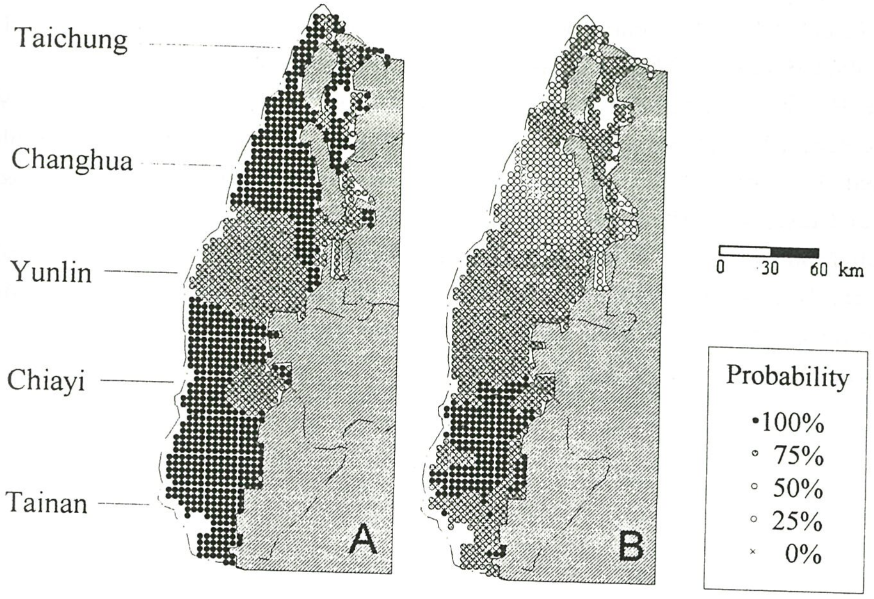

Figure 8. Spatial distribution of probabilities of having severe soil droughtness for soils having effective depth of 1m from October to next January (A) or next April (B).

引用文獻

申雍、黃學文。1996。臺灣西南部地區氣象資料有效範圍之檢驗。中華農業氣象 3：(印刷中)。

台灣省農田水利會聯合會。1994。台灣區農田水利會八十二年度資料輯。

邱永和。1977。區域蒸散量估算問題：以台灣西南地區爲例。氣象學報 23：35-42。

施嘉昌、黃振昌。1989。從氣象因子估算玉米需水量之研究。台灣地區農業氣象資源應用研討會專輯。p127-140。中央氣象局。

徐森雄、宋義達。1987。從氣象資料估算蒸發量。中華水土保持學報 18：83-89。

徐玉標。1967。土壤物理性質對土壤水分常數之相關性研究。農工學報 13：7-25。

張建勛、蔡明華。1985。灌溉與排水。中國土木水利工程學會。

陳清田。1991。嘉義地區作物需水量推估之研究。中國農業工程學報 37: 82-109。

曾文柄、朱鈞、郭文鑠、楊之遠。1984。台灣地區農業氣候資源應用之研究。中央氣象局。

曾國珍。1981。還原電位和總體密度對水稻根系分布與產量的影響。國立中興大學土壤學研究所碩士論文。

黃金山。1992。台灣農業經營的轉變及用水的調整。農業用水管理研討會論文集。p 77-89。中國農業工程學會。

蔡東耀。1990。深層翻土改良土壤排水和壓實的效果。國立中興大學土壤學研究所碩士論文。

謝兆申、王明果。1991。台灣地區主要土類圖輯。國立中興大學土壤調查試驗中心。

雜作灌溉手冊。1980。台灣省水利局。

Brutsaert, W. 1984. Evaporation into the at-

mosphere-Theory, History, and Applications. D. Reidel Publishing Company.

Gates, D. M. 1962. Energy Exchange in the Biosphere. Harper & Row, New York.

Hall, D. G. M., Reeve, M. J., Thomasson, A. J. and Wright, V. F. 1977. Water retention, porosity and density of field soils. Soil Surv. Tech. Monogr. No. 9.

Jensen, M. E. and H. R. Haise. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. J. Irrig. Drainage Div. ASCE 89:15-41.

Penman, H. L. 1949. The dependence of transpiration on weather and soil conditions. J. Soil Sci. 1:74-89.

Rosenberg, N. J., B. L. Blad. and S. B. Verma. 1983. Micro-climate: The biological environment. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc.

Thomasson, A. J. 1979. Assessment of Soil Droughtiness. Soil Surv. Tech. Monogr. No. 13. p 43-50.